青铜峡引黄灌区农田灌溉水入渗与玉米分层吸水规律研究

马国荣[1]， 庄淏然[1]， 许德浩[1]， 马永成[1]， 赵梦扬[1]， 冯克鹏[1,2,3]

（1. 宁夏大学土木与水利工程学院，宁夏 银川 750021；2. 宁夏黄河水联网数字治水重点实验室，宁夏 银川 750021；3. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心，宁夏 银川 750021）

摘 要：玉米是干旱区灌溉农业的主要作物之一，研究灌溉水入渗与玉米分层吸水规律对理解玉米农田系统中土壤-植被-大气连续体（SPAC）输水过程尤为重要。以地处干旱气候带的宁夏青铜峡引黄灌区为研究区域，采集了玉米生育期内降水、灌溉水、地下水、玉米茎秆以及1 m内不同深度的7层土壤样品，分析了其δ^2H、$\delta^{18}O$的变化特征，并在氢氧稳定同位素的指示下，结合土壤体积含水率研究了灌溉水进入田间后的入渗过程，进而分别运用直接对比法和贝叶斯混合模型研究了玉米对各层土壤水分的吸收比例和规律。结果表明：(1) 青铜峡引黄灌区历次降水、灌溉水、地下水的氢氧同位素呈富集趋势，玉米茎秆水氢氧同位素逐渐贫化；土壤水氢氧同位素在浅层（0~30 cm）富集，浅层以下趋于稳定。(2) 灌区大气降水线为$\delta^2H=6.67\delta^{18}O-9$，降水受云下二次蒸发作用影响显著，降水和灌溉水进入田间后在土壤表面进行了强烈的蒸发，地下水受降水和灌溉水补给。(3) 灌溉水在进入田间后的5 d内迅速下渗，活塞流是灌区内土壤水的主要入渗形式。(4) 灌区玉米主要吸收0~30 cm浅层土壤水，整个生育期吸收比例达到44.70%；灌水后玉米的主要吸水层位没有发生变化，浅层贡献比例最大。(5) 玉米对土壤水的分层吸收利用与土壤温度、土壤体积含水率密切相关，浅层土壤温度的升高以及由于蒸腾和蒸发作用导致的土壤体积含水率降低，促使玉米增加对中深层土壤水的利用；浅层土壤水分对玉米生长至关重要，干旱情况下需要通过及时灌溉补充玉米主要吸水土壤层水分以保证其正常的生长发育。

关 键 词：稳定同位素；灌溉水入渗；直接对比法；MixSIAR模型；根系吸水变化；大气降水线

文章编号：1000-6060(2024)11-1899-16(1899~1914)

全球气候变暖对农田生态系统的影响日益加剧，给农作物的正常生长带来了重大挑战，尤其是在干旱半干旱地区，由于水资源稀缺，农业发展受到严重限制[1-2]。玉米是世界主要的粮食作物之一，在农业生产中发挥着关键作用；作为全球第二大玉米生产国，我国玉米产量和种植面积分别占全球的22.4%和20.0%[3]；水分和温度是决定干旱半干旱地区玉米生长的主要环境因素，直接影响着玉米不同生育阶段的生长速度与分布[4]，而灌溉则可以调节土壤水分与温度，为玉米提供适宜的生长环境，从而保障玉米产量。然而，我国农田灌溉输水效率仅为57.6%[5]，相较于发达国家仍有待提高，农业节水潜力巨大。在这一背景下，研究农田灌溉水入渗过程及玉米分层吸水特点，可为优化灌溉管理，提高灌溉水利用效率提供科学依据，对推动农田生态系统的可持续发展具有重要意义。

氢氧稳定同位素（^2H、^{18}O）是水分子的组成部分，可作为一种天然有效的“示踪剂”来揭示水在土

收稿日期：2023-11-24； **修订日期**：2024-03-11

基金项目：清华大学-宁夏银川水联网数字治水联合研究院联合开放基金资助项目（sklhse-2023-Iow11）；国家重点研发计划项目（2021YFD1900600）；宁夏自然科学基金重点项目（2021AAC02007，2022AAC02007）；宁夏高等学校一流学科建设项目（NX-YLXK2021A03）资助

作者简介：马国荣（1999-），男，硕士研究生，主要从事灌区农田水文过程及水分利用效率研究. E-mail: mgr1005@163.com

通讯作者：冯克鹏（1979-），男，博士，教授，主要从事水文遥感与农业遥感、气候变化与水文响应研究. E-mail: fengkp@nxu.edu.cn

壤和植物体中的运输过程[6]。土壤水的同位素组成可以反映土壤水源以及水在土壤中的运动形式[7]。植物吸水来源的研究方法主要有根系挖掘法[8]、植物水势法[9]和水分监测法[10]等。根系挖掘法是根据有无根系分布确定植物的可能利用水源,该方法不仅费时费力且对植物和土壤的破坏性较大,植物水势法通过测定植物黎明前水势比较不同植物水分来源的差异,水分监测法是通过连续监测土壤含水量变化来分析植物从各层土壤吸收的水量;以上这些方法虽然都可以在一定程度上确定植物的水分来源,但都无法定量分析植物对各个水源的利用比例。以往的研究表明,植物根系从土壤中吸收水分沿着根部向上运输过程中不发生氢氧稳定同位素分馏,植物导管内水可以看作是根系吸收所有水源的混合物[11-12],因此,可以通过分析植物茎秆水和潜在水源的氢氧同位素组成,来比较计算植物对不同潜在水源的利用比例。基于氢氧同位素分析植物吸水来源的方法主要包括直接对比法和模型法。直接对比法是通过比较植物茎秆水与潜在水源的同位素组成来确定植物水源的图形推理方法[13]。模型法可以量化植物对潜在水源的利用比例,包括多元线性混合模型(IsoSource)和贝叶斯混合模型(SIAR、MixSIR、MixSIAR)[14]。其中,IsoSource模型在计算潜在水源的贡献率时,没有考虑水源的不确定性和水源同位素组成的空间差异性等因素,从而导致模型计算结果的不确定性较大[15];MixSIAR模型结合了SIAR和MixSIR的优点,能够将固定和随机效应作为协变量来解释混合比例的可变性,显著提高了定量计算潜在水源对植物生长贡献率的准确性[16]。因此,氢氧稳定同位素技术为研究土壤水分运动和植物水分来源提供了一种灵敏、有效且可靠的方法[17]。

水在土壤剖面中主要有活塞流和优先流2种入渗形式[18]。活塞流是指土壤中的“新水”推动“旧水”逐渐缓慢向下移动;优先流则是指“新水”绕过大部分土壤基质通过裂隙、虫洞、作物根孔等开放通道快速移动[19]。钟晓菲等[20]研究表明兰州南北两山深层土壤水的入渗补给模式一致,均为活塞流模式。王仕琴等[21]研究发现均质土壤条件下降水入渗较快,活塞流为主要入渗形式,而非均质土壤条件下活塞流入渗的同时可能还存在大孔隙优先流。李彩霞等[22]对根区交替控制灌溉条件下玉米根系吸水的研究结果表明:20~70 cm为玉米生殖生长阶段吸水需求最大的土壤层,吸水贡献率达43.21%~55.48%。杨培岭等[23]对咸淡水交替灌溉条件下玉米的吸水规律进行研究得出:拔节期、抽穗期和灌浆期的主要吸水层位分别为:0~20 cm,20~40 cm和0~20 cm。郭慧文[24]对民勤玉米耗水规律的研究结果表明:玉米整个生长期主要利用0~10 cm的浅层土壤水,且随着生长会逐渐增加对深层土壤水的利用比例。吴友杰[25]研究得出交替沟灌条件下玉米吸收深层和湿润侧土壤水分的比例会提高4%~26%,土壤水分是一个灌溉周期内影响玉米根系吸水的主导因素。Wang等[26]研究表明:夏玉米拔节期主要吸收利用0~20 cm层土壤水(96%~99%),开花期吸水层位增加到20~50 cm(58%~85%),成熟期主要吸水层位为0~20 cm(69%~76%)。Yang等[27]研究发现黑河流域灌溉玉米优先从0~10 cm土壤层吸收水分,平均吸收比例为87±15%。综上,前人已对土壤水入渗和玉米分层吸水进行了大量研究,但对于地处干旱气候带的宁夏青铜峡灌区,其农田系统中灌溉水的入渗形式和玉米的分层吸水规律尚不明确。

本文以宁夏青铜峡灌区农田及玉米为研究对象,通过各层土壤水氢氧稳定同位素信息,示踪灌溉水进入田间后在土壤中的入渗过程,并基于氢氧稳定同位素,采用直接对比法和MixSIAR模型相结合的定性定量分析方法,分析玉米生育期内对不同层土壤水的利用变化特征,认识玉米农田生态系统中作物-土壤界面的水分运移,为灌区合理制定水资源管理措施,提高水资源利用效率提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青铜峡灌区地处宁夏中北部,是宁夏引黄灌区中面积最大的组成部分,总土地面积约212.5×10^4 hm^2,平均海拔1100 m(图1)。该地区属于典型的中温带大陆性气候,年均气温8.5 ℃,日照时数2870~3080 h,无霜期约174 d;灌区内,干旱少雨,蒸发量大,多年平均降水量180~220 mm,主要集中在每年的7—9月,年均蒸发量1000~1500 mm。灌区农业种植常年依靠引灌黄河水,土壤类型多为壤土或砂壤土。试验农田位于青铜峡市瞿靖镇尚桥村

(106°05′E,38°11′N,海拔1080 m)[28],种植作物为玉米,行距50~60 cm,株距20~25 cm,地下水埋深在1.5 m以上[29],在玉米生育期总共灌水2次(灌水日期分别为2022年6月26日、2022年8月4日)。

1.2 样品采集及数据观测

(1) 样品采集

在田间直线上每隔200 m采取不同土层的土壤鲜样,同时在采集土壤样本点附近随机选取一株长势良好的玉米对其茎秆取样(图2),每次采样选取5个采样点,分别在苗期(2022年5月22日)、拔节期(2022年6月23日)、大喇叭口期(2022年7月21日)、抽雄期(2022年8月5日)、吐丝期(2022年8月30日)、成熟期(2022年9月15日)和灌水后连续5 d(2022年8月5—9日)采样,并收集玉米生长期内灌溉水、降水和地下水样品。

① 土壤样品

在选好的采样点上用土钻分别取0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm、60~80 cm及80~100 cm层的土样,然后将取得的土壤样品均匀混合后装入10 mL玻璃样品瓶中,装满后在瓶口塞入脱脂棉,用parafilm封口膜密封,通过保温箱(0~4 ℃)带回实验室。

② 玉米茎秆样品

用剪刀截取选好玉米植株的根和茎,并迅速装入10 mL玻璃样品瓶中,用封口膜密封。将取得的所有茎秆样品通过保温箱带回实验室。

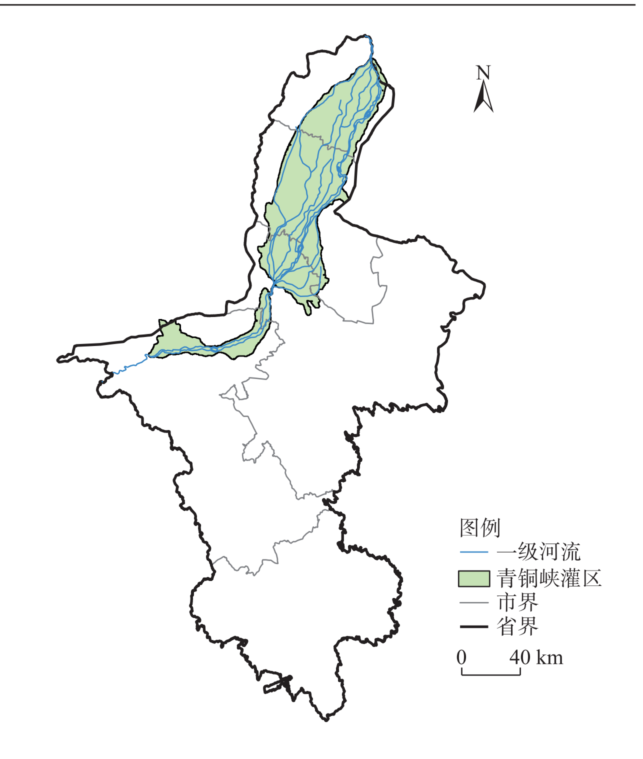
③ 降水、灌溉水及地下水样品

每次降水和灌水事件发生后,用500 mL塑料瓶进行水样初步收集,将收集到的水样带回室内后转入10 mL玻璃样品瓶中,用parafilm封口膜密封。试验田内布设有一口地下水位观测井,从该观测井提取地下水样本,并装入10 mL玻璃样品瓶中用封口膜密封,带回实验室。

以上样品转入室内后,为防止蒸发分馏,全部置于-15 ℃的冰柜中冷冻保存,待后续进行真空抽提出可供氢氧稳定同位素分析的进样。

(2) 数据观测

通过灌区内农田生态系统观测站,对降水量、空气温度进行实时监测;在农田0~100 cm深度土壤剖面内每隔20 cm放置土壤三参传感器(TEROS12,Meter),用于监测土壤温度和体积含水率,以上数据的监测记录频率均为15 min·次$^{-1}$。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2023)336号的标准地图制作,底图边界无修改。

图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

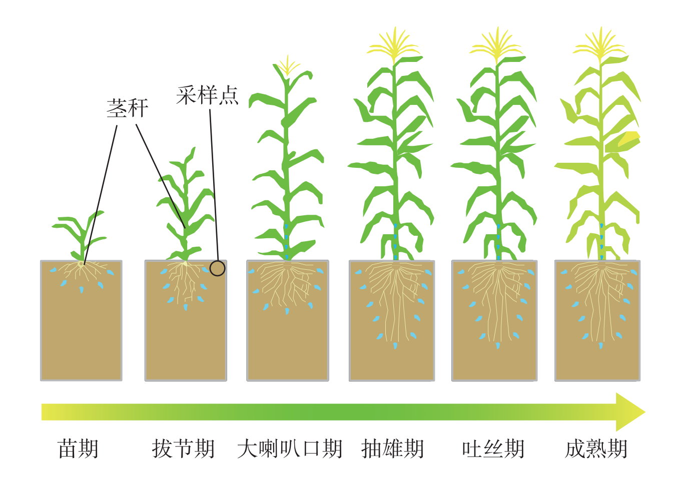


图2　生育阶段划分与采样点示意图

Fig. 2　Schematic diagram of reproductive stage division and sampling point

1.3 水分提取与同位素测定

采用全自动真空冷凝抽提系统(LI-2000,LI-CA,China)将土壤样品和玉米茎秆中的水分抽提出来,供后续氢氧稳定同位素测定。每次抽提前,为保证真空状态对抽提系统的全阀和总体阀进行气密性检测,检测后将全阀预冷到-80 ℃,总体阀预热

到198 ℃,预冷和预热时间分别为40 min、60~90 min。预冷预热结束后开始抽取样品中的水分,土壤和茎秆样品的抽提时间为60 min。

对抽提好的水样进行氢氧稳定同位素测定,采用基于OA-ICOS技术的液态水同位素分析仪GLA431-TLWIA(912-0050),该设备使用LGR内部控温技术使测定精度更高。测定结果用相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的千分差(δ,‰)表示:

$$\delta=\left(\frac{R_{样品}}{R_{标准}}-1\right)\times 1000\% \quad (1)$$

式中:$R_{样品}$和$R_{标准}$分别为水样和V-SMOW中重同位素和轻同位素的相对丰度(‰),即同位素比率。δ^2H的测量精度为±0.15‰,$\delta^{18}O$的测量精度为±0.02‰。

为了消除甲醇类主要有机污染物的影响,用标准曲线对δ^2H值和$\delta^{18}O$值进行校正。标准曲线的创建步骤为:首先采用色谱纯的甲醇和去离子水,配置不同浓度的水溶液,其次使用光谱分析软件(LWIA)测量所有样品,得到δ^2H、$\delta^{18}O$和窄带光谱影响系数(NB),最后利用测量同位素值与真值的差值取对数,与NB建立校准方程(图3)。以后测量样品时,得到NB后,代入校准方程得到差值,再与实际测量值相加,就可得到修正后的δ值。

1.4 根系分层吸水规律分析方法

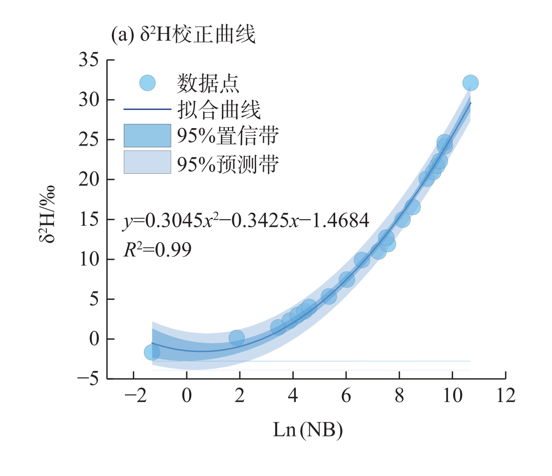
作物根系分布是立体的,可以从不同深度吸收水分。为了详细并定量刻画玉米吸水来源,本文首先采用直接对比法定性分析玉米根系的主要吸水层位,再采用MxiSIAR模型定量计算不同层土壤水对玉米生长的贡献比例。采用直接对比法时,将同一时期茎秆水与土壤水的同位素值绘制在一起,利用茎秆水同位素直线与土壤水同位素分布线的交点确定玉米的主要吸水层位。使用MixSIAR模型计算时,将不同层土壤水的δ^2H、$\delta^{18}O$值作为水源数据(Sources),茎秆水δ^2H、$\delta^{18}O$值作为混合数据(Mixture),玉米根系吸水到茎秆的过程中默认不发生氢氧同位素分馏,分馏参数(TDF)设为0;马尔可夫链蒙特卡洛(MCMC)运行时长先设为test,确认模型正常运行,误差结构设定为仅残差,通过Gelman-Rubin和Geweke 2个诊断条件来确定模型计算运行后是否收敛,若不收敛,则增加MCMC运算时长(normal,long,very long),直到模型收敛,模型输出结果用平均值表示。

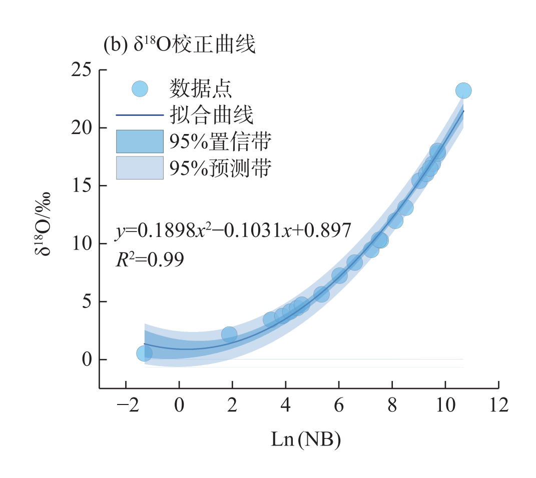
青铜峡灌区内玉米主要水分来源包括黄河灌溉水和少量降水,它们入渗到不同深度土层后形成的土壤水是玉米生长过程中的潜在水源。将0~100 cm土壤分为3层,即浅层(0~30 cm)、中层(30~60 cm)和深层(60~100 cm)。

2 结果与分析

2.1 降水和灌溉水同位素组成变化特征

玉米生育期内(2022年5月15日—2022年9月23日)降水量、气温、降水和灌溉水的$\delta^{18}O$值变化如图4所示。生育期内降水总量118.5 mm,单次最大降水量发生在7月11日,降水量达到30.6 mm,44.3%的降水集中在7月;日平均气温为24 ℃,日最高气温和日最低气温分别发生在8月7日和5月18日,分别为37.4 ℃和3.5 ℃。降水和灌溉水δ^2H和





注:NB为窄带光谱影响系数。

图3 δ^2H和$\delta^{18}O$值的校正曲线

Fig. 3 Correction curves of δ^2H and $\delta^{18}O$ values

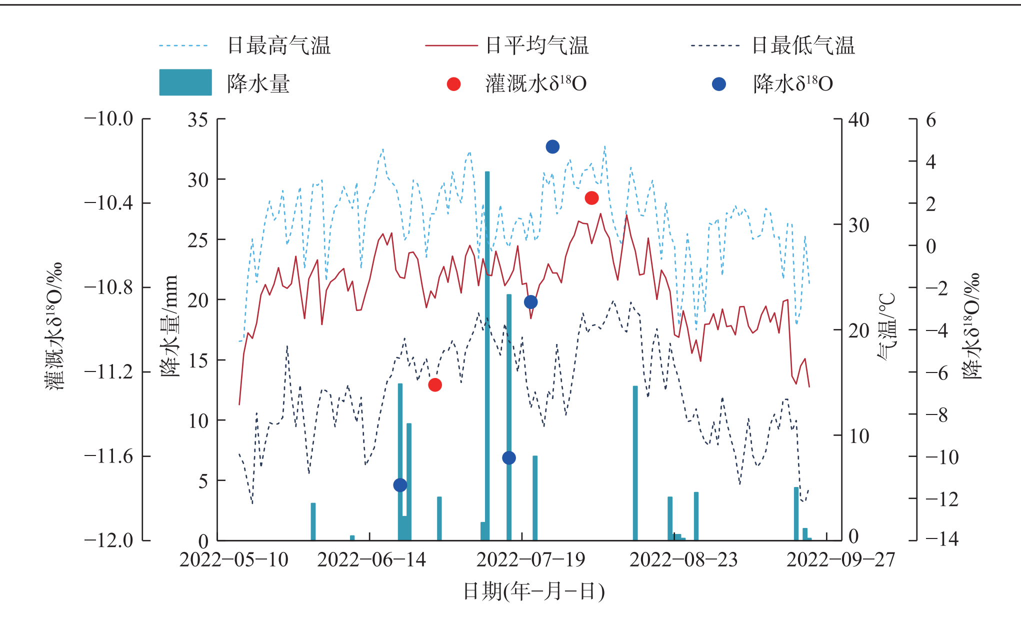


图4　降水量、降水和灌溉水 $\delta^{18}O$ 值及气温变化

Fig. 4　Changes of precipitation, precipitation and irrigation water $\delta^{18}O$ values, and temperature

$\delta^{18}O$ 值变化特征一致，降水的 $\delta^{18}O$ 值不断增大，在-11.36‰~4.68‰之间，平均值为-4.86‰，标准差为6.43‰。2次灌溉水的 $\delta^{18}O$ 值变化较小，在-11.26‰~-10.37‰之间，平均值为-10.82‰。

2.2　玉米茎秆水和土壤水同位素组成变化特征

2.2.1　茎秆水与0~100 cm混合土壤水同位素组成变化特征　玉米茎秆水的 δ^2H 值在-88.25‰~-53.19‰之间，平均值为-71.49‰；$\delta^{18}O$ 值在-10.89‰~-1.44‰之间，平均值为-7.99‰。0~100 cm混合土壤水的 δ^2H 值在-81.68‰~-61.49‰之间，平均值为-72.76‰；$\delta^{18}O$ 值在-10.26‰~-5.80‰之间，平均值为-8.72‰。茎秆水和0~100 cm混合土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值的变幅不同，茎秆水的变幅较大，但平均值接近（表1）。

玉米茎秆水与0~100 cm混合土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值变化特征一致。图5显示了茎秆水和土壤水在生育期不同阶段和灌水后5 d $\delta^{18}O$ 值的变化情况。可见，生育期内茎秆水和土壤水氧同位素均不断贫化（图5a、c），而灌水后5 d则逐渐富集（图5b、d）；灌水后0~100 cm混合土壤水 $\delta^{18}O$ 的值先减小后增大，反映了灌溉水进入田间后的入渗与蒸发过程（图5d）。

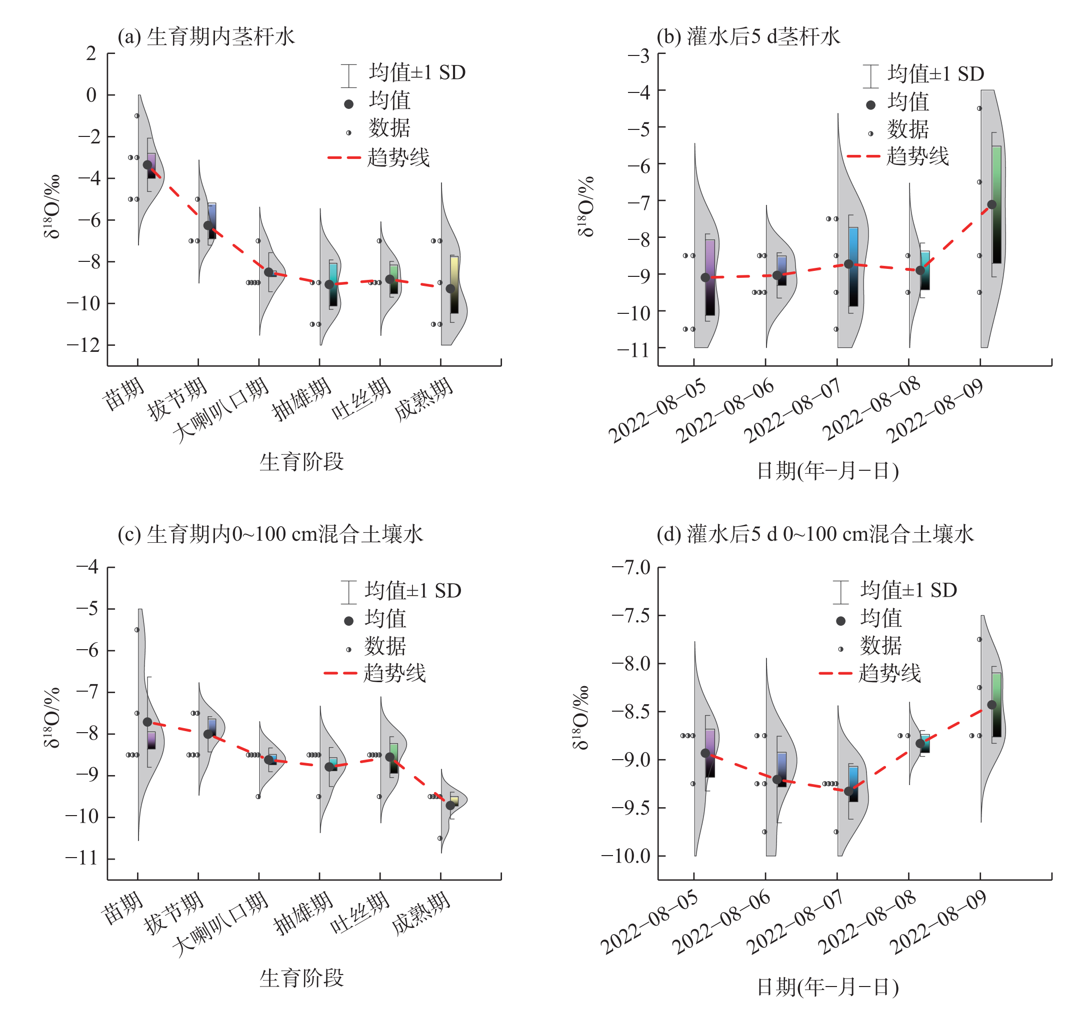
2.2.2　土壤水同位素在垂直剖面内的组成变化特征　总体上，土壤水的氢氧稳定同位素值随着土壤深度的增加而逐渐减小（表2）。其中，0~10 cm层的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 均值最大，分别为-57.48‰、-6.06‰；而60~80 cm和80~100 cm层的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 均值最小，分别为-75.82‰、-9.46‰。在垂直剖面内，δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值波动最大的土壤层是10~20 cm层，其中 δ^2H 值的波动范围为-74.70‰~-39.48‰，变幅为35.22‰；$\delta^{18}O$ 值的波动范围为-9.23‰~-3.51‰，变幅为5.72‰。而 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值波动最小的土壤层为80~100 cm层，其中 δ^2H 值的波动范围为-79.42‰~-72.80‰，变幅为6.62‰；$\delta^{18}O$ 值的波动范围为-10.18‰~-8.78‰，变幅为1.40‰。

由图6可见，生育期内0~30 cm层土壤水氢氧同位素呈现富集的趋势。其中，拔节期和大喇叭口期0~30 cm层同位素组成分布表现出与其他生育阶

表1　生育期内玉米茎秆水与0~100 cm混合土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 特征值统计

Tab. 1　Statistics of δ^2H and $\delta^{18}O$ characteristic values of maize stalk water and 0-100 cm mixed soil water during the growth period

样本类型	δ^2H/‰				$\delta^{18}O$/‰			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
玉米茎秆水	-53.19	-88.25	-71.49	8.66	-1.44	-10.89	-7.99	2.11
0~100 cm混合土壤水	-61.49	-81.68	-72.76	4.03	-5.80	-10.26	-8.72	0.83



注:误差棒表示标准差;样本数量n=5。下同。

图5 不同生育阶段和灌水后5 d茎秆水与土壤水$\delta^{18}O$值变化

Fig. 5 Changes in $\delta^{18}O$ values of stalk water and soil water at different reproductive stage and in the five days after irrigation

表2 不同层土壤水$\delta^{2}H$和$\delta^{18}O$特征值统计

Tab. 2 Statistics of $\delta^{2}H$ and $\delta^{18}O$ characteristic values of soil water in different layers

土壤层/cm	$\delta^{2}H$/‰				$\delta^{18}O$/‰			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
0~10	-43.50	-66.88	-57.48	7.00	-4.06	-8.21	-6.06	1.28
10~20	-39.48	-74.70	-63.95	11.97	-3.51	-9.23	-6.83	2.19
20~30	-67.35	-78.63	-72.95	3.48	-7.25	-9.69	-8.71	0.78
30~40	-68.30	-77.77	-73.75	2.84	-7.37	-9.63	-8.88	0.71
40~60	-69.11	-81.03	-75.34	4.09	-7.77	-10.23	-9.24	0.77
60~80	-71.36	-79.30	-75.82	2.62	-8.41	-9.93	-9.39	0.49
80~100	-72.80	-79.42	-75.61	2.34	-8.78	-10.18	-9.46	0.44

段不同的趋势,主要原因是在这2个采样日前有降水事件发生,具有负的同位素值的雨水进入土壤表层,与原有的土壤水混合,导致该层的土壤水同位素分布趋势发生逆转。将30~100 cm层土壤水$\delta^{2}H$和$\delta^{18}O$值进行线性拟合,各生育阶段$\delta^{2}H$值拟合回归方程的斜率分别为:苗期(-0.08)、拔节期(-0.01)、大喇叭口期(-0.07)、抽雄期(-0.05)、吐丝期(-0.05)、成熟期(-0.02);$\delta^{18}O$值拟合回归方程的斜率分别为:苗期(-0.02)、拔节期(-0.01)、大喇叭口期(-0.01)、抽雄期(-0.01)、吐丝期(-0.01)、成熟期(-0.01)。上述拟合结果表明,各生育阶段30~100 cm层土壤水氢氧同位素分布趋势相似,且与0~30 cm层相比变

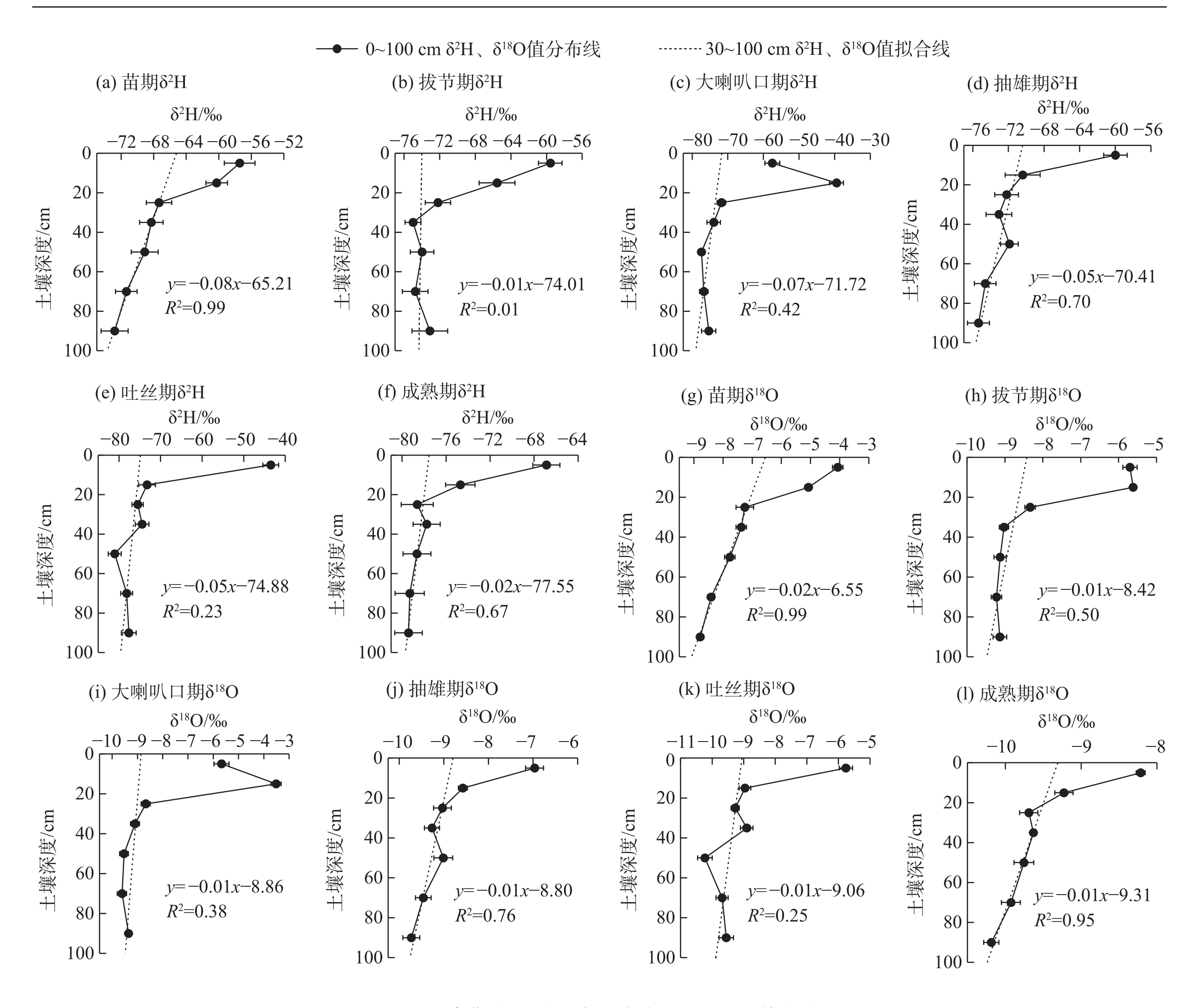


图6 生育期内不同深度土壤水δ²H和δ¹⁸O值变化

Fig. 6 Changes in soil water δ²H and δ¹⁸O values at different depths during the growth period

幅较小，对比δ²H和δ¹⁸O值拟合线斜率的变化范围，可见¹⁸O较²H稳定。

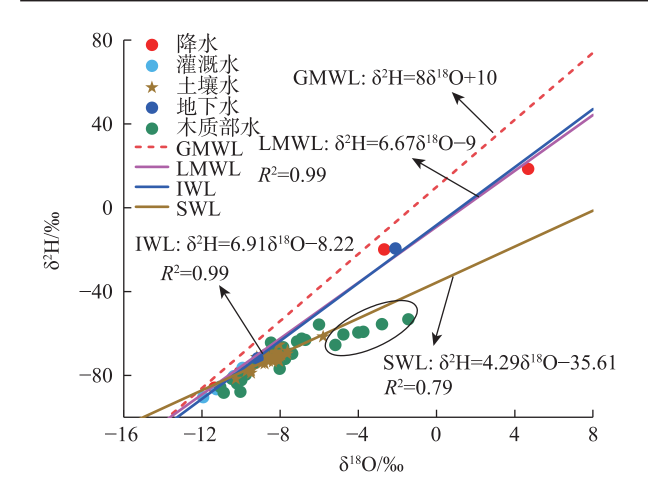
2.3 青铜峡灌区不同水体氢氧同位素分布特征

对降水、灌溉水、0~100 cm土壤水氢氧同位素值点进行线性拟合，分别得到青铜峡灌区大气降水线（LMWL），灌溉水线（IWL）与土壤水线（SWL）。由图7可见，生育期内LMWL为：δ²H=6.67δ¹⁸O−9（R^2=0.99），相对于全球大气降水线（GMWL：δ²H=8δ¹⁸O+10）[30]，LMWL的斜率和截距较小，说明灌区内干旱高温，降水量少，降水在下落过程中受强烈云下二次蒸发作用影响，发生了不平衡的同位素动力分馏效应[31]。IWL与LMWL斜率与截距接近；SWL位于IWL和LMWL右下方，其斜率和截距均小于LMWL和IWL，表明降水和灌溉水进入田间后在土壤表面经历了强烈的蒸发。

地下水氢氧同位素值点落在LMWL和IWL附近，表明地下水受降水和灌溉水补给。玉米茎秆水同位素值点落在SWL附近，表明土壤水是玉米的主要水源[32]。苗期茎秆水的同位素值点相对于其他生育阶段有所偏离（图7中黑色椭圆圈内），是由于苗期吸收的浅层土壤水受蒸发作用导致氢氧同位素富集，茎秆水同位素也相应富集，有更高的δ²H和δ¹⁸O值。

2.4 玉米吸收水分溯源

2.4.1 直接对比法分析玉米的主要吸水层位 利用直接对比法判断玉米主要吸水层位的结果如图8所示。玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄期、吐丝期、成熟期的交点分别在10~20 cm、20~30 cm、10~20 cm、



注:GMWL为全球大气降水线;LMWL为当地大气降水线;IWL为灌溉水线;SWL为土壤水线;R^2为决定系数。

图7 生育期内不同水体δ^2H和$\delta^{18}O$的关系

Fig. 7 Relationships between δ^2H and $\delta^{18}O$ in different water bodies during the growth period

10~20 cm和10~20 cm处。灌水后第3 d、第4 d、第5 d分别在0~10 cm、10~20 cm和10~20 cm处存在交点。

总体上,直接对比法的结果表明:玉米整个生育期内主要吸收浅层(0~30 cm)土壤水,灌水后主要吸水层位不发生变化。苗期(图8a)未出现交点,灌水后第1 d(图8g)、第2 d(图8h)存在多个交点,无法判断主要吸水层位,由此也说明直接对比法并不总是稳定。

2.4.2 MixSIAR定量分析玉米吸水水分来源 利用双同位素(^2H和^{18}O)在贝叶斯混合模型MixSIAR中定量计算各层土壤水在生育期不同阶段对玉米吸水的贡献比例(图9a)。整个生育期内,0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm层土壤水的平均贡献比例分别为15.63%、14.88%、14.21%、14.24%、14.11%、13.76%和13.24%,其中,0~10 cm、10~20 cm层土壤水的平均贡献比例占优,随着土壤深度增加,各层土壤水平均贡献比例依次减小。

浅层(0~30 cm)土壤水各生育阶段的贡献比例分别为:苗期(52.2%)、拔节期(45.87%)、大喇叭口期(40.73%)、抽雄期(37.40%)、吐丝期(45.68%)、成熟期(46.45%),平均贡献比例为44.72%。因此,从整个生育期来看,浅层土壤水为玉米的生长提供了主要水源。苗期到抽雄期,浅层土壤水的贡献比例逐渐减小,抽雄期以后又不断增大,呈现先降低后升高的变化规律。

中层(30~60 cm)土壤水各生育阶段的贡献比例分别为:苗期(24.80%)、拔节期(27.67%)、大喇叭口期(29.03%)、抽雄期(32.50%)、吐丝期(28.35%)、成熟期(27.75%),平均贡献比例为28.35%。深层(60~100 cm)土壤水各生育阶段的贡献比例分别为:苗期(23.00%)、拔节期(26.77%)、大喇叭口期(30.17%)、抽雄期(30.20%)、吐丝期(26.02%)、成熟期(25.80%),平均贡献比例为26.99%。中、深层土壤水贡献比例在苗期时较小,到抽雄期达到最大,抽雄期后逐渐减小,呈现出先升高后降低的变化规律。

图9b显示了灌水后5 d玉米吸收不同层土壤水占比的变化。灌水后第1 d,0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm各层土壤水的贡献比例分别为10.05%、12.15%、15.20%、16.30%、16.20%、15.65%、14.55%;灌水后第5 d,各层土壤水的贡献比例分别为16.67%、15.23%、13.33%、13.50%、15.60%、12.90%、12.80%。第5 d比第1 d,0~10 cm、10~20 cm层的贡献比例分别增加6.62%和3.08%,20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm各层贡献比例则分别减小1.87%、2.80%、0.60%、2.75%、1.75%,说明灌水后玉米增加了对浅层土壤水的吸收利用。

3 讨论

3.1 直接对比法与MixSIAR模型分析结果的比较

直接对比法判断的玉米主要吸水层位与MixSIAR模型分析计算的结果基本一致[33]。直接对比法只通过茎秆水和土壤水的交点来判断玉米的主要吸水层位,但苗期不存在交点,灌水后第1 d、第2 d又存在多个交点,无法判断主要吸水层位。存在多个交点的原因可能是受灌水影响,灌水后玉米根系增加对土壤水分的吸收,灌溉水进入田间后入渗与原有的土壤水混合改变了各层土壤水的同位素组成,根系吸收的各层土壤水处于一个动态变化过程,这就导致茎秆水同位素信息变得复杂。由此也说明,直接对比法优点在于较为直观、简单易用,但因为它可能无法捕捉到系统中的所有影响因素,所以精度有限,当存在多个水源或茎秆水同位素信息变得复杂时,其判断结果存在局限性和不确定性[34-35]。

MixSIAR模型基于^2H和^{18}O双稳定同位素,考虑了水源的不确定性和多水源混合作用,能够准确量

注：图g~k中日期对应灌水后第1~5 d。下同。

图8 不同生育阶段及灌水后5 d吸水层位变化

Fig. 8 Changes in water-absorbing layers of maize at different reproductive stages and in the five days after irrigation

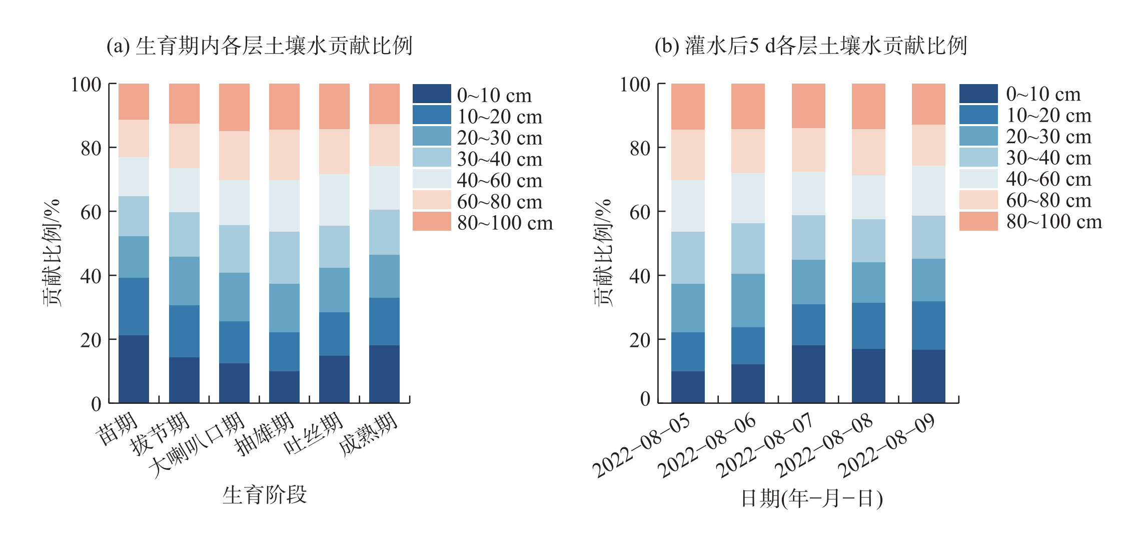


图9 MixSIAR量化不同生育阶段及灌水后5 d各层土壤水对玉米吸水的贡献比例

Fig. 9 MixSIAR quantifies the proportion of soil water contribution to water uptake by maize in each layer at different reproductive stage and in the five days after irrigation

化多个水源分别对玉米生长的贡献比例，可以避免当茎秆水和土壤水没有交点或存在多个交点时判断结果的误差，适用于复杂系统。MixSIAR模型是一种基于贝叶斯统计学的混合模型，可以更好地处理复杂的水系统，考虑多个可能的源头，更符合实际情况；同时，MixSIAR模型能够考虑源头比例的不确定性，提供了更为全面的结果，适用于源头比例不确定或变化较大的情况。但MixSIAR模型对于输入数据的要求较高，需要详细的同位素特征数据，而这些数据的获取则需要更多的实验和分析。

3.2 氢氧稳定同位素示踪视角的灌溉水入渗规律

土壤体积含水率和土壤剖面内同位素组成变化可以反映灌溉水进入田间后的入渗过程[36-37]。灌区内各层土壤体积含水率变化如图10所示，40~60 cm层土壤体积含水率相较于其他土层变化范围较小，在33.24%~40.23%之间，其次是80~100 cm和60~80 cm层，变化范围分别为30.26%~39.01%、27.03%~39.97%；0~20 cm和20~40 cm层受灌水、降水、土壤蒸发和作物蒸腾作用的影响体积含水率波动较大，最低时仅为22.14%，最高时达40.95%。第二次灌水前0~20 cm、20~40 cm层土壤体积含水率分别下降至27.05%和29.08%，灌水后5 d内，0~20 cm和20~40 cm层体积含水率在达到峰值后迅速下降，平均每天分别下降1.09%和1.45%，40~60 cm层体积含水率则下降缓慢，60~80 cm和80~100 cm层体积含水率几乎不变。

第二次灌水后5 d内0~100 cm深度土壤水同位素变化如图11所示。采用线性拟合方程的斜率表征30~100 cm层土壤水同位素分布变化，并结合本文2.2节对不同生育阶段土壤水同位素分布规律的分析可以发现：灌区内没有灌水时，30~100 cm层土壤水同位素的分布斜率均在−0.01左右；灌水后，斜率则变为正值，且在灌水后第5 d恢复到灌水前的分布斜率，即土壤水同位素值随着土壤深度的增加逐渐减小。造成灌水后30~100 cm层土壤水同位素组成变化的主要原因是灌溉水的同位素较原有土壤水的同位素更贫化[38]，在入渗过程中与原有的土壤水混合，进而影响土壤垂直剖面内同位素的组成分布[39]。

土壤水入渗受土壤类型、土壤性质、土地利用方式等因素的影响[40]。灌水后5 d内0~40 cm层土

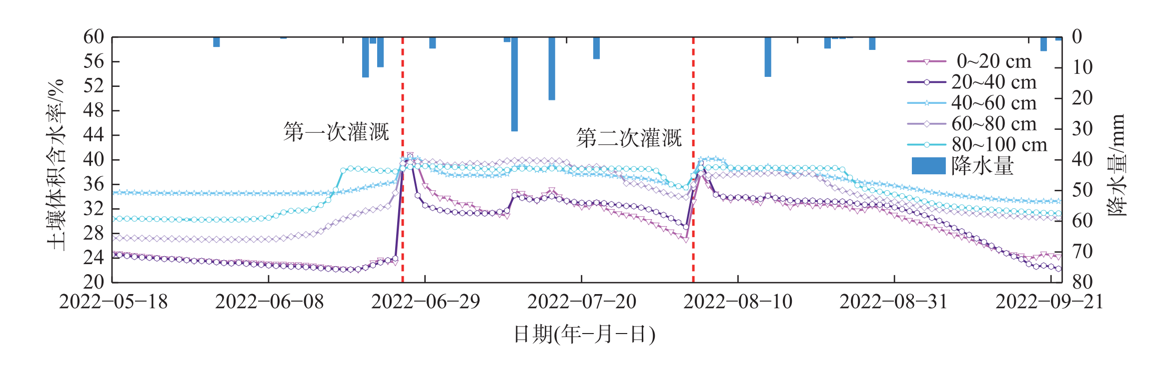


图10 生育期内土壤体积含水率与降水量变化

Fig. 10 Changes of soil volumetric water content and precipitation during the growth period

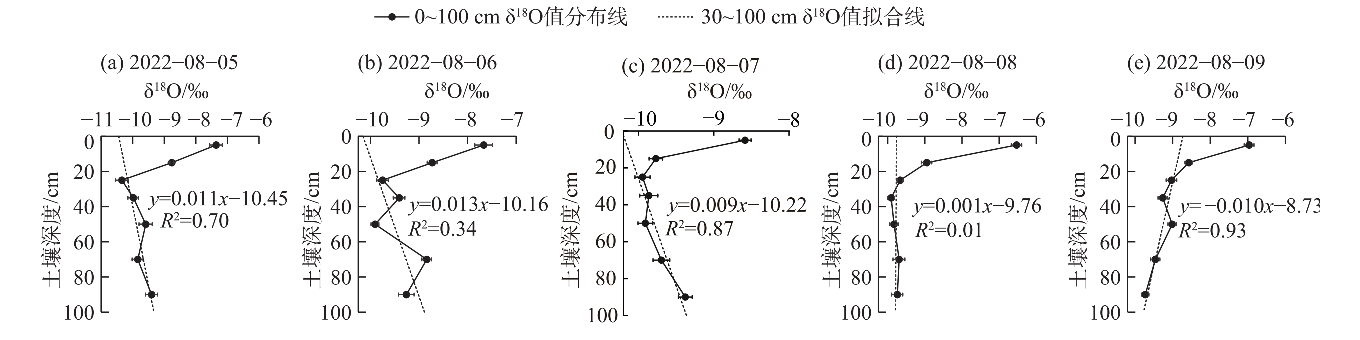


图11 灌水后5 d不同深度土壤水 $\delta^{18}O$ 值变化

Fig. 11 Changes in soil water $\delta^{18}O$ values at different depths in the five days after irrigation

壤体积含水率的迅速下降以及土壤垂直剖面内同位素值呈先降低后升高的分布趋势，表明灌溉水进入田间后在土壤中发生了自上而下的活塞流入渗。0~40 cm层土壤体积含水率在灌水后第5 d趋于稳定，土壤水同位素分布斜率也在第5 d恢复到灌水前的斜率，表明灌溉水在0~40 cm土壤层的入渗时间不超过5 d。

3.3　土壤温度、土壤体积含水率对玉米根系吸水的影响

玉米水分利用策略的变化受根系生长分布状况、温度、土壤水分以及土壤质地等因素的影响[41]。玉米根系由初生根、次生根和气生根3种根系构成，以往的研究表明玉米根系主要分布在0~30 cm土壤层[42]，根系的干重和长度自拔节期到抽雄期迅速增长，并在抽雄期前后达到最大[43]。本文利用直接对比法和MixSIAR模型对玉米吸水层位的研究结果表明：浅层(0~30 cm)土壤水为玉米的生长提供了主要水分。生育期内空气温度和土壤温度变化以及各层土壤水对玉米生长的贡献比例如图12所示，浅层土壤温度与空气温度变化趋势一致。

本文发现玉米生育期不同阶段及灌水后5 d对各层土壤水吸收比例的变化与土壤温度之间有响应。苗期到拔节期，浅层土壤温度升高导致的干旱胁迫和玉米根系向下生长共同影响作用促使玉米增加对中深层土壤水的吸收利用，吸收比例增加了6.33%；拔节期到抽雄期，根系生长和干旱胁迫影响作用进一步增大，对中深层土壤水的吸收比例继续增加，一直到抽雄期增加了8.47%；抽雄期以后，玉米

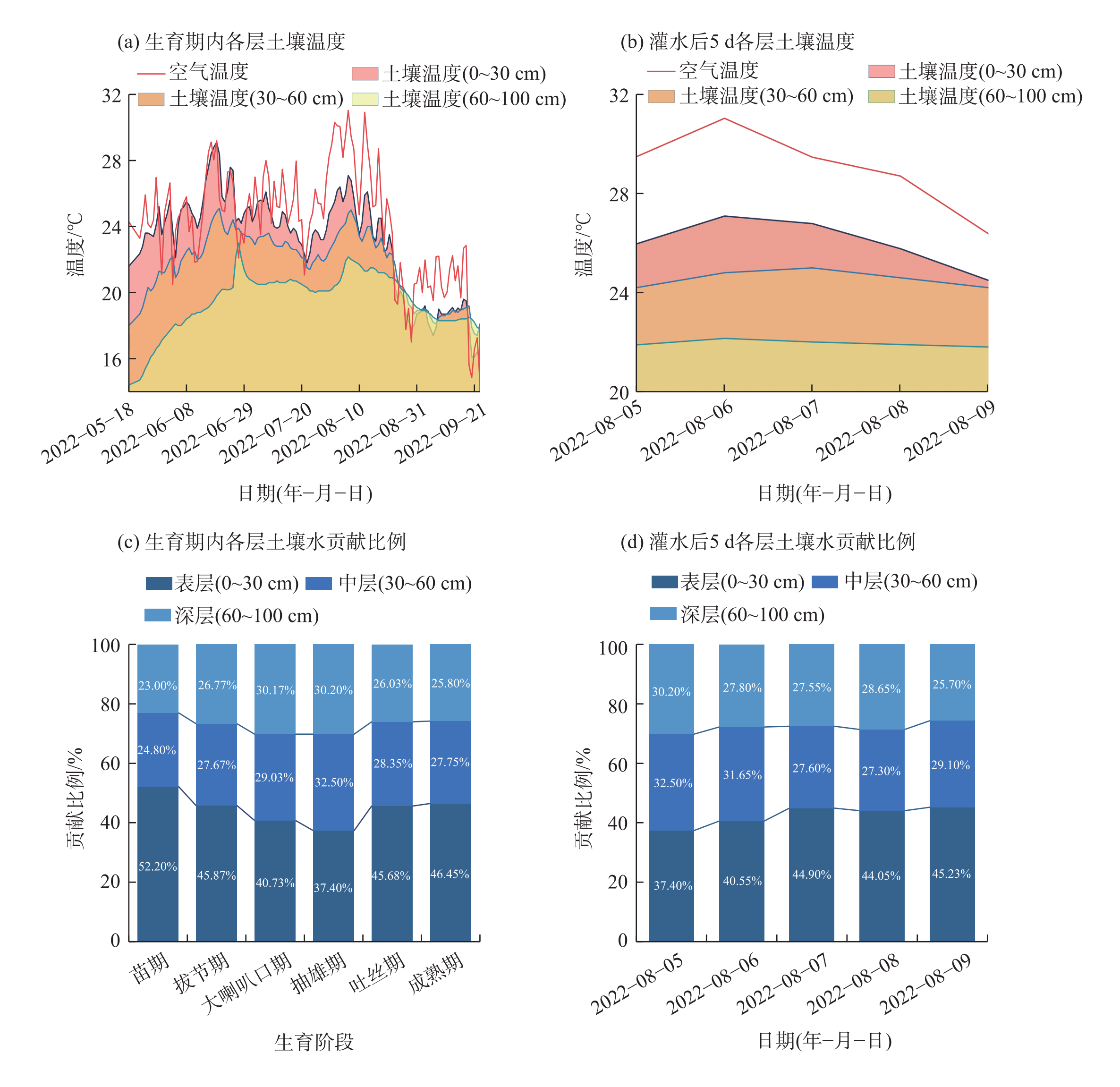


图12　空气温度、土壤温度与各层土壤水贡献比例变化

Fig. 12　Changes in air temperature, soil temperature and the proportion of soil water contribution in each layer

根系几乎不再生长，空气温度降低导致浅层土壤温度也降低，使得玉米对浅层土壤水的吸收比例增加，成熟期对浅层土壤水的吸收比例相较于抽雄期增加了9.05%。灌水后5 d，随着浅层土壤温度的降低，玉米对浅层土壤水的吸收比例逐渐增加。总体来说，玉米生育期内对浅层土壤水的吸收比例变化表现出先降低后升高的规律，对中层和深层土壤水的吸收比例变化则表现出先升高后降低的规律（图12c），对浅层土壤水吸收比例的变化规律与浅层土壤温度的变化规律相反。浅层和中深层根系对土壤水分的吸收存在互补效应，这与杨明达等[44]的研究结果一致。

土壤水分对作物吸水有深刻的影响[45]。灌区0~100 cm深度土壤层内，中深层（40~100 cm）土壤体积含水率总体高于浅层（0~30 cm）。对不同层土壤水对玉米吸水的贡献比例与该层土壤的体积含水率进行相关性分析（图13），结果表明：浅层土壤水贡献比例与土壤体积含水率呈负相关关系，中、深层土壤水贡献比例与土壤体积含水率呈正相关关系。浅层土壤水分受蒸发和玉米根系吸水作用影响波动较大，当浅层土壤含水量过低时会导致玉米缺水，需及时灌溉补充该层土壤水分，以确保玉米的正常生长发育。

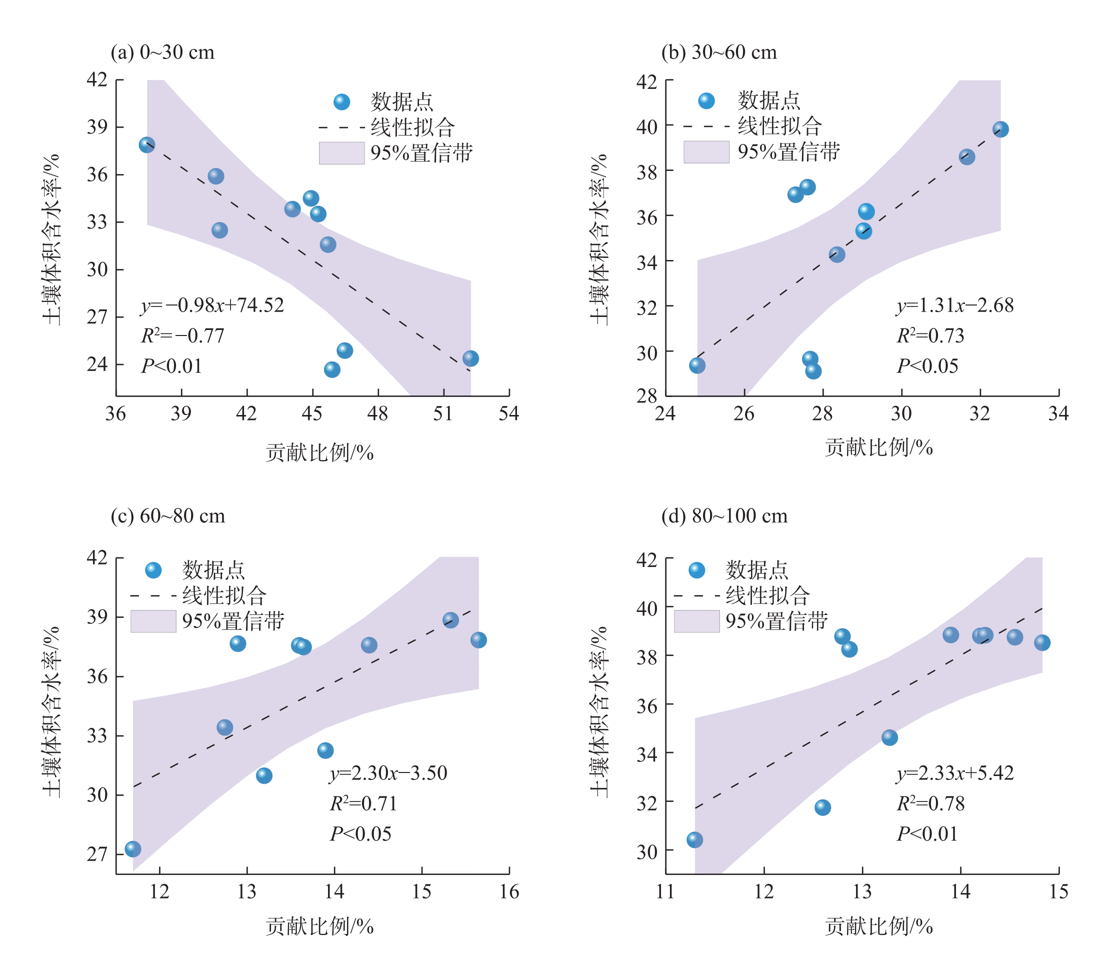


图13 各层土壤水贡献比例与土壤体积含水率相关性分析

Fig. 13 Correlation analysis between the proportion of soil water contributed in each layer and soil volumetric water content

4 结论

（1）青铜峡引黄灌区降水在下落过程中受强烈的云下二次蒸发作用影响，使得灌区大气降水线的斜率和截距均小于全球大气降水线，降水和灌溉水进入田间后在土壤表面进行了强烈的蒸发，氢氧同位素在浅层（0~30 cm）土壤富集明显，灌区内地下水主要受降水和灌溉水补给。

（2）灌溉水在进入田间后的5 d内迅速下渗，活塞流是灌区内土壤水的主要入渗形式。灌区玉米主要吸收利用0~30 cm的浅层土壤水，对浅层土壤水的利用比例表现出先降低后升高的变化规律，对

中、深层土壤水的利用比例表现出先升高后降低的变化规律；灌水后玉米会增加对浅层土壤水的吸收比例，但主要吸水层位不发生变化。

（3）玉米的分层吸水变化规律与土壤温度和土壤体积含水率有关，气温升高导致的浅层土壤温度上升以及蒸腾和蒸发作用导致的土壤体积含水率降低，促使玉米增加对中深层土壤水的利用；浅层土壤水贡献比例与土壤体积含水率呈负相关关系，中、深层土壤水贡献比例与土壤体积含水率呈正相关关系，凸显了浅层土壤水分对玉米生长的重要性。

综上，地处干旱气候带的青铜峡引黄灌区内土壤蒸发强烈，土壤温度和土壤水分是影响玉米对土壤水吸收利用的2个关键因素。因此，干旱情况下需通过及时灌溉补充玉米主要吸水土壤层水分，以保证其正常的生长发育。

参考文献（References）

[1] Guo Q, Huang G M, Guo Y L, et al. Optimizing irrigation and planting density of spring maize under mulch drip irrigation system in the arid region of northwest China[J]. Field Crops Research, 2021, 266: 108141, doi: 10.1016/j.fcr.2021.108141.

[2] 杨阳, 齐月, 赵鸿, 等. 水分胁迫对干旱半干旱区玉米关键生育期生长发育及产量的影响及评价[J]. 干旱气象, 2022, 40(6): 1059–1067. [Yang Yang, Qi Yue, Zhao Hong, et al. Effects and evaluations of water stress on growth development and yield of maize during critical growth periods in arid and semi-arid regions [J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(6): 1059–1067.]

[3] 韩新生, 许浩, 蔡进军, 等. 立地因子和盖度对宁南黄土区中庄小流域玉米土壤水分的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 112–122. [Han Xinsheng, Xu Hao, Cai Jinjun, et al. Effects of site factor and coverage on soil moisture of maize field in Zhongzhuang small watershed in the loess area of southern Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 112–122.]

[4] 龚容, 徐霞, 田晓宇, 等. 三种锦鸡儿属植物水力结构特征及其干旱适应策略[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 4984–4993. [Gong Rong, Xu Xia, Tian Xiaoyu, et al. Hydraulic architecture characteristics and drought adaption strategies for three *Caragana* genus species[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 4984–4993.]

[5] 康绍忠. 中国农业节水十年: 成就、挑战及对策[J]. 中国水利, 2024(10): 1–9. [Kang Shaozhong. Ten years of agricultural water-saving in China: Achievements, challenges and measures[J]. China Water Resources, 2024(10): 1–9.]

[6] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展, 2006(5): 738–747. [Zhang Yinghua, Wu Yanqing, Wen Xiaohu, et al. Application of environmental isotopes in water cycle[J]. Advances in Water Science, 2006(5): 738–747.]

[7] 李丙祥, 刘秀花, 陈云飞. 毛乌素沙地包气带土壤水稳定同位素分布特征及其来源判别[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(9): 110–117. [Li Bingxiang, Liu Xiuhua, Chen Yunfei. Distribution characteristics and source discrimination of soil water stable isotope in shallow aerated zone of Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(9): 110–117.]

[8] 郝帅, 李发东. 艾比湖流域典型荒漠植被水分利用来源研究[J]. 地理学报, 2021, 76(7): 1649–1661. [Hao Shuai, Li Fadong. Water sources of the typical desert vegetation in Ebinur Lake Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(7): 1649–1661.]

[9] 李光莹, 祖姆热提·于苏甫江, 董正武, 等. 古尔班通古特沙漠西南缘地区多枝柽柳（*Tamarix ramosissima*）生理特性对沙堆不同堆积阶段的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(8): 1–14. [Li Guangying, Yusufujiang Zumrat, Dong Zhengwu, et al. Response of physiological characteristics of *Tamarix ramosissima* to different accumulation stages of cones in the southwestern margin of Gurbantungut Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(8): 1–14.]

[10] 聂云鹏, 陈洪松, 王克林. 土层浅薄地区植物水分来源研究方法[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2427–2433. [Nie Yunpeng, Chen Hongsong, Wang Kelin. Methods for determining plant water source in thin soil region: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(9): 2427–2433.]

[11] Ruppenthal M, Oelmann Y, Wilcke W. Isotope ratios of nonexchangeable hydrogen in soils from different climate zones[J]. Geoderma, 2010, 155(3): 231–241.

[12] Vega-Grau A M, McDonnell J, Schmidt S, et al. Isotopic fractionation from deep roots to tall shoots: A forensic analysis of xylem water isotope composition in mature tropical savanna trees[J]. Science of the Total Environment, 2021, 795: 148675, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148675.

[13] 高阳, 韩磊, 柳利利, 等. 宁夏河东沙地不同坡度柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)水分利用策略差异[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1212–1223. [Gao Yang, Han Lei, Liu Lili, et al. Differences in water use strategies of *Caragana korshinskii* at different slopes in the east sandy land of the Yellow River in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1212–1223.]

[14] 曾祥明, 徐宪立, 钟飞霞, 等. MixSIAR和IsoSource模型解析植物水分来源的比较研究[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5611–5619. [Zeng Xiangming, Xu Xianli, Zhong Feixia, et al. Comparative study of MixSIAR and IsoSource models in the analysis of plant water sources[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5611–5619.]

[15] 杜勤勤. 基于氢氧稳定同位素的兰州市南北两山植物水分来源研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020. [Du Qinqin. Study on water sources of plant species based on stable oxygen and hydrogen isotopes in the northern and southern mountains of the Lanzhou City[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.]

[16] Stock B C, Jackson A L, Ward E J, et al. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models[J]. PeerJ, 2018, 6: e5096, doi: 10.7717/peerj.5096.

[17] 林光辉. 稳定同位素生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 125-432. [Lin Guanghui. Stable isotope ecology[M]. Beijing: Chinese High Education Press, 2013: 125-432.]

[18] 刘目兴, 宋兴敏, 卢世国, 等. 三峡库区不同植被覆盖坡地的土壤优先流运动特征研究[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1321-1335. [Liu Muxing, Song Xingmin, Lu Shiguo, et al. Research on the characteristics of preferential flow movement along varied hillslopes covered with different vegetation in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(5): 1321-1335.]

[19] Sun Z Y, Feng M M, Zhang X Y, et al. A healthier water use strategy in primitive forests contributes to stronger water conservation capabilities compared with secondary forests[J]. Science of the Total Environment, 2022, 851: 158290, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158290.

[20] 钟晓菲, 张明军, 张宇, 等. 基于稳定同位素的兰州市南北两山土壤水入渗模式[J]. 干旱区研究, 2023, 40(11): 1744-1753. [Zhong Xiaofei, Zhang Mingjun, Zhang Yu, et al. Soil water infiltration process in north and south mountains of Lanzhou City based on stable isotope[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(11): 1744-1753.]

[21] 王仕琴, 宋献方, 肖国强, 等. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 495-501. [Wang Shiqin, Song Xianfang, Xiao Guoqiang, et al. Appliance of oxygen and hydrogen isotope in the process of precipitation infiltration in the shallow groundwater areas of North China Plain[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 495-501.]

[22] 李彩霞, 周新国, 孙景生, 等. 根区交替控制灌溉条件下玉米根系吸水规律[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2170-2176. [Li Caixia, Zhou Xinguo, Sun Jingsheng, et al. Root water uptake of maize with controlled root-divided alternative irrigation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2170-2176.]

[23] 杨培岭, 王瑜, 任树梅, 等. 咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 273-281. [Yang Peiling, Wang Yu, Ren Shumei, et al. Soil moisture and saline distribution characteristics and maize stem water uptake under alternate irrigation between saline water and groundwater[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 273-281.]

[24] 郭慧文. 基于氢氧稳定同位素的民勤绿洲玉米耗水规律研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021. [Guo Huiwen. Water consumption of maize in the Minqin oasis based on hydrogen and oxygen stable isotopes[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2021.]

[25] 吴友杰. 基于稳定同位素的覆膜灌溉农田SPAC水分传输机制与模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. [Wu Youjie. Water transfer mechanism and simulation of SPAC in irrigated and film-mulching farmland based on stable isotope[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.]

[26] Wang P, Song X F, Han D M, et al. A study of root water uptake of crops indicated by hydrogen and oxygen stable isotopes: A case in Shanxi Province, China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(3): 475-482.

[27] Yang B, Wen X F, Sun X M. Irrigation depth far exceeds water uptake depth in an oasis cropland in the middle reaches of Heihe River Basin[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 15206, doi: 10.1038/srep15206.

[28] 庄淏然, 冯克鹏, 许德浩. 蒸散分离的玉米水分利用效率变化及影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1117-1130. [Zhuang Haoran, Feng Kepeng, Xu Dehao. Changes, influencing factors and sensitivity of water use efficiency in maize farmland ecosystems based on evapotranspiration separation in the Ningxia irrigated area[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7): 1117-1130.]

[29] 许德浩, 冯克鹏, 庄淏然. WOFOST作物模型对青铜峡灌区夏玉米生长模拟的适用性评估[J]. 西北水电, 2023(4): 15-22. [Xu Dehao, Feng Kepeng, Zhuang Haoran. Applicability evaluation of WOFOST crop model for summer maize growth simulation in Qingtongxia irrigation area[J]. Northwest Hydropower, 2023(4): 15-22.]

[30] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.

[31] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.

[32] 杨晔, 张明军, 张宇, 等. 基于氢氧稳定同位素的兰州南山绿化植物种选择——以锦鸡儿为例[J]. 生态学杂志, 2023, 42(1): 83-90. [Yang Ye, Zhang Mingjun, Zhang Yu, et al. Selection of greening plant species in the south Mountains of Lanzhou based on hydrogen and oxygen stable isotopes: A case study of *Caragana*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(1): 83-90.]

[33] 张岁梦, 叶丽敏, 周肄智, 等. 南方丘陵区马尾松-麻栎群落水分利用来源及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2023, 34(7): 1729-1736. [Zhang Suimeng, Ye Limin, Zhou Yizhi, et al. Water use sources and its influencing factors of *Pinus massoniana* and *Quercus acutissima* community in hilly region of southern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(7): 1729-1736.]

[34] 张宇, 张明军, 王圣杰, 等. 基于稳定氧同位素确定植物水分来源不同方法的比较[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1356-1368. [Zhang Yu, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Comparison of different methods for determining plant water sources based on stable oxygen isotope[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1356-1368.]

[35] 杜俊杉, 马英, 胡晓农, 等. 基于双稳定同位素和MixSIAR模型的冬小麦根系吸水来源研究[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6611-6622. [Du Junshan, Ma Ying, Hu Xiaonong, et al. Applying dual stable isotopes and a MixSIAR model to determine root water uptake of winter wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6611-6622.]

[36] 岳伶俐, 夏雄, 胡德勇, 等. 基于氢氧同位素的油茶果实生长高峰期水分来源量化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 154-161. [Yue Lingli, Xia Xiong, Hu Deyong, et al. Quantifying the water

sources of *Camellia oleifera* during fruit growth peak period using hydrogen and oxygen isotopes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(20): 154−161.]

[37] Zhu G F, Yong L L, Zhang Z X, et al. Infiltration process of irrigation water in oasis farmland and its enlightenment to optimization of irrigation mode: Based on stable isotope data[J]. Agricultural Water Management, 2021, 258: 107173, doi: 10.1016/j.agwat.2021.107173.

[38] 赵志鹏, 杨丽虎, 公亮, 等. 永宁引黄灌区土壤水分运移的同位素特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 42−49. [Zhao Zhipeng, Yang Lihu, Gong Liang, et al. Tracing water infiltration in soils with isotopes in the Yongning irrigation district in the Yellow River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39 (10): 42−49.]

[39] Brooks J R, Barnard H R, Coulombe R, et al. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(2): 100−104.

[40] 杨源峰, 韦慧, 王建羽, 等. 喀斯特区两种岩性发育土壤入渗特征及其影响因素[J]. 农业现代化研究, 2023, 44(6): 1103−1116. [Yang Yuanfeng, Wei Hui, Wang Jianyu, et al. Infiltration characteristics and influencing factors of two types of lithological soils in karst regions[J]. Research of Agricultural Modernization, 2023, 44 (6): 1103−1116.]

[41] Albasha R, Mailhol J C, Cheviron B. Compensatory uptake functions in empirical macroscopic root water uptake models-experimental and numerical analysis[J]. Agricultural Water Management, 2015, 155: 22−39.

[42] 吕国红, 谢艳兵, 温日红, 等. 东北玉米根系生物量模型的构建[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(4): 572−580. [Lü Guohong, Xie Yanbing, Wen Rihong, et al. Modeling root biomass of maize in northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27 (4): 572−580.]

[43] 陈鹏狮, 纪瑞鹏, 谢艳兵, 等. 东北春玉米不同发育期干旱胁迫对根系生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 156−163. [Chen Pengshi, Ji Ruipeng, Xie Yanbing, et al. Effects of drought stresses during key growth periods on root growth of spring maize in northeast China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 156−163.]

[44] 杨明达, 张素瑜, 杨慎骄, 等. 地下滴灌对冬小麦-夏玉米根系吸水特征的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 36(5): 1−13. [Yang Mingda, Zhang Suyu, Yang Shenjiao, et al. Effects of subsurface drip irrigation on root water uptake of winter wheat and summer maize [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 36(5): 1−13.]

[45] 马仪, 黄组桂, 贾江栋, 等. 基于无人机-卫星遥感升尺度的土壤水分监测模型研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 307−318. [Ma Yi, Huang Zugui, Jia Jiangdong, et al. Soil moisture monitoring model based on UAV-satellite remote sensing scale-up[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 307−318.]

Water infiltration and maize root water uptake patterns in the Qingtongxia Yellow River irrigation district

MA Guorong[1], ZHUANG Haoran[1], XU Dehao[1], MA Yongcheng[1], ZHAO Mengyang[1], FENG Kepeng[1,2,3]

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Key Laboratory of the Internet of Water and Digital Water Governance of the Yellow River in Ningxia, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Ningxia Engineering Research Center for Water-Saving Irrigation and Water Resources Control, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Maize is a key crop in irrigated agriculture in arid regions, and understanding the infiltration of irrigation water and stratified water uptake patterns of maize is crucial for studying the soil-plant-atmosphere continuum water transfer processes within maize field systems. This study was conducted in the Qingtongxia Yellow River irrigation district in the arid climatic conditions of Ningxia, China. During the maize growing season, samples of precipitation, irrigation water, groundwater, maize stems, and soil from seven depths within 1 meter were collected. The isotopic variations of δ^2H and $\delta^{18}O$ were analyzed. Using the guidance of hydrogen and oxygen stable isotopes combined with soil moisture content analysis, the infiltration process of irrigation water into the field was investigated. The absorption proportions and patterns of maize water uptake from various soil layers were examined using both the direct comparison method and Bayesian mixture models. The results indicate that: (1) The hydrogen and oxygen isotopes of successive precipitation, irrigation water, and groundwater in the Qingtongxia Yellow River irrigation district show an enrichment trend, while those of maize stem water gradually deplete; isotopes of soil water are enriched in the shallow layers (0−30 cm) and stabilize below this depth. (2) The atmospheric precipitation line in the irrigation district is represented by $\delta^2H=6.67\delta^{18}O-9$, with precipitation significantly influenced by secondary evaporation under clouds. After entering the field, both precipitation and irrigation water undergo intense surface evaporation, while groundwater is replenished by both. (3) Irrigation water rapidly infiltrates into the field within five days of application, with piston flow as the primary infiltration mechanism in the irrigation district. (4) Maize predominantly absorbs water from the shallow soil layer (0−30 cm), with the absorption proportion reaching 44.70% over the entire growth period; following irrigation, there is no significant change in the main water absorption layer of maize, with the shallow layer contributing the most. (5) The stratified absorption and utilization of soil water by maize are closely correlated with soil temperature and moisture content. The increase in shallow soil temperature and the decrease in soil moisture content due to transpiration and evaporation promote enhanced utilization of water from the middle and deep soil layers. Adequate moisture in the shallow soil layer is crucial for maize growth, and under arid conditions, timely irrigation is necessary to replenish water in the main soil layer to ensure normal growth and development.

Key words: stable isotope; irrigation water infiltration; direct contrast method; MixSIAR model; root water absorption changes; atmospheric precipitation line